

**XXIV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
PUNTA DEL ESTE, URUGUAY, NOVIEMBRE 2010**

**ESTUDIO EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO DEL MEANDRO DE
QUINZANAS (ASTURIAS)**

Georgina Corestein¹, Ernest Bladé², Cristina Lechuga³, M^a. Isabel Berga⁴, Alba González⁵

¹ Instituto Flumen, CIMNE - Universitat Politècnica de Catalunya, España, georgina.corestein@upc.edu

² Instituto Flumen, CIMNE - Universitat Politècnica de Catalunya, España, ernest.blade@upc.edu

³ Laboratorio de Hidráulica, Centro de Estudios Hidrográficos, CEDEX, España, cristina.lechuga@cedex.es

⁴ Laboratorio de Hidráulica, Centro de Estudios Hidrográficos, CEDEX, España, m.isabel.berga@cedex.es

⁵ Laboratorio de Hidráulica, Centro de Estudios Hidrográficos, CEDEX, España, alba.gonzalez@cedex.es

RESUMEN:

Se estudia el comportamiento hidrodinámico del meandro de Quinzanas en el río Narcea en Asturias, España. Se consideran los caudales máximos para los períodos de retorno 500, 100, 5 y 2 años. El estudio involucra la modelación mediante un modelo físico reducido, que se construyó en las instalaciones del CEH a escala 1:85 y en el que se realizaron ensayos para todos los caudales propuestos. También implica la representación mediante modelo numérico, utilizando para ello el código IBER (CARPA), con el que se realizaron simulaciones para todos los caudales, para diferentes situaciones y reproduciendo los ensayos realizados en laboratorio. Este trabajo se centra en la metodología y resultados del modelo numérico que se muestra como una herramienta eficiente como complemento del modelo físico y que los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio permiten calibrar y validar el modelo numérico. Se puede concluir que el trabajo conjunto de ambas metodologías resulta satisfactorio para la resolución del problema planteado.

ABSTRACT:

We study the hydrodynamic behaviour of Quinzanas meander in the Narcea River in Asturias, Spain. Maximum discharges are considered for return periods of 500, 100, 5 and 2 years. The study involves the modelling using a physical scaled model, built on the premises of HEC in scale 1:85 and in which trials were conducted for all proposed flows. It also involves representation by numerical model, using the code IBER (CARPA), in which simulations were performed for all flow rates for different playing situations and laboratory tests performed. This work focused in the methodology and results of the numerical model which shows as an efficient tool to complement the physical model and the results obtained from laboratory tests allows calibrating and validating the numerical model. We conclude that the joint work of both methodologies is satisfactory for the resolution of the proposed problem.

PALABRAS CLAVES:

Modelación numérica bidimensional, Numérico-Experimental, Modelo IBER.

INTRODUCCIÓN

El curso bajo del río Narcea es uno de los tramos fluviales con un mejor estado de conservación de toda la Cornisa Cantábrica española (Figura 1). A pesar de ello, la regulación hidrológica y la ocupación de su llanura aluvial han generado algunos impactos de importancia que disminuyen sensiblemente los valores naturales del río. Debido a ello, este tramo fluvial ha sido seleccionado por la Confederación Hidrográfica del Cantábrico como uno de los escenarios en los que se va a llevar a cabo en la cuenca cantábrica la ENRR – Estrategia Nacional de Restauración de Ríos que promueve el Ministerio de Medio Ambiente, Rural y Marino.



Figura 1.- Río Narcea a su paso por la zona de estudio.

La dinámica del río en el tramo de estudio ha sido fuertemente alterada por diversas actuaciones a lo largo de los últimos 25 años, especialmente las canalizaciones realizadas, entre las cuales destaca la ubicada en el meandro de Quinzanas. Esta obra supuso un notable aumento de la sección natural del río, de forma que, desde el inicio de su construcción en el año 1985, se ha producido un rápido proceso de colmatación sedimentaria tanto en el tramo de las obras como aguas abajo (Figura 2). Adyacente a dicho tramo se ubica la localidad de Santa Ana, una de las más afectadas en la región por inundaciones, con períodos de retorno inferiores a 10 años.



Figura 2.- Río Narcea a su paso por la zona de estudio, obras existentes.

El gran número de agentes involucrados en el problema, algunos de ellos con intereses contrapuestos, hace necesario que su estudio y análisis se realice teniendo en cuenta la mayor cantidad de variables posibles para poder responder adecuadamente a cada uno dichos intereses. Es

por ello que, entre otras cosas, la Confederación Hidrográfica del Cantábrico solicitó el asesoramiento del CEDEX.

En este contexto el Laboratorio de Hidráulica del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX y el grupo Flumen, de la Universitat Politècnica de Catalunya, realizaron un acuerdo para estudiar conjuntamente la restauración hidromorfológica del Meandro de Quinzanas. Los primeros mediante un modelo físico reducido y mediante un modelo numérico los segundos.

El tramo objeto de este estudio se encuentra en el río Narcea a la altura de la localidad de Quinzanas, aproximadamente 1 km aguas arriba de la confluencia con el río Nalón.

OBJETIVOS

El principal resultado a alcanzar en este estudio es una propuesta de geometría y eventuales protecciones en el meandro de Quinzanas que consiga un buen funcionamiento hidráulico y morfológico del mismo.

Así mismo, como objetivos más específicos, se busca colaborar en la puesta en marcha del modelo físico y emplear los resultados de los ensayos que se realicen para calibrar y verificar el modelo numérico utilizado para la simulación del flujo en ríos.

METODOLOGÍA

Se crean simultáneamente, y basándose en la misma información topográfica, ambos modelos, el físico y el numérico. La definición de la longitud exacta del tramo a modelar y las características fundamentales que deberán representarse está a cargo de los expertos del Laboratorio Hidráulico del CEH.

Se realizan las simulaciones numéricas necesarias para ayudar a decidir algunas características del modelo físico, por ejemplo la posición y tipo de condición de contorno de salida, y una vez definidos todos los detalles del modelo físico se adapta el modelo numérico a estos.

Teniendo los dos modelos coordinados y en funcionamiento se realizan para los caudales estipulados ensayos en el modelo físico y simulaciones en el modelo numérico. Los resultados obtenidos se comparan y analizan para validar y calibrar, principalmente el módulo de transporte de sedimentos del modelo numérico.

Finalmente se realizan simulaciones alterando la geometría según las propuestas del Documento de participación pública (CHC 2009).

DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS NUMÉRICOS

Modelo IBER (CARPA)

El estudio se inició utilizando el modelo CARPA (Bladé y Gómez 2006) y se continuó con el modelo IBER, que es el resultado de la fusión del primero con el modelo Turbillón (Cea 2005).

CARPA (Cálculo en Alta Resolución de Propagación de Avenidas) es una herramienta de cálculo numérico del flujo de agua en lámina libre y régimen variable desarrollado en el grupo de

investigación Flumen de la E.T.S. de Ing. de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona (Universitat Politècnica de Catalunya). CARPA resuelve las ecuaciones de Saint Venant con esquemas numéricos explícitos basados en la técnica de los volúmenes finitos, dadas unas condiciones iniciales, unas condiciones de contorno, una rugosidad y unos parámetros de cálculo (incremento de tiempo de cálculo, umbral de secado-mojado).

TURBILLON es un modelo numérico diseñado para la simulación de flujo turbulento en lámina libre, en régimen no permanente, desarrollado en el GEAMA de la Universidad de Coruña. Este modelo resuelve también las ecuaciones de Saint Venant con un esquema numérico de volúmenes finitos. Una de las principales características de TURBILLON es la inclusión de diversos modelos de turbulencia tipo RANS, los cuales se resuelven en el módulo de turbulencia.

IBER, que como ya se dijo surge de la fusión de las capacidades de CARPA y Turbillón, es un modelo numérico de simulación de flujo turbulento en lámina libre en régimen no-permanente, y de procesos medioambientales en hidráulica fluvial. El rango de aplicación de Iber abarca la hidrodinámica fluvial, la simulación de rotura de presas, la evaluación de zonas inundables, el cálculo de transporte de sedimentos, el flujo de marea en estuarios.

El modelo IBER consta actualmente de 3 módulos de cálculo principales: un módulo hidrodinámico, un módulo de turbulencia y un módulo de transporte de sedimentos. Todos los módulos trabajan sobre una malla no estructurada de volúmenes finitos formada por elementos triangulares o cuadriláteros.

En el módulo hidrodinámico, el cual constituye la base de IBER, se resuelven las ecuaciones de aguas someras bidimensionales promediadas en profundidad (ecuaciones de St. Venant 2D).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U_x}{\partial x} + \frac{\partial h U_y}{\partial y} = M_s \quad [1]$$

$$\frac{\partial h U_x}{\partial t} + \frac{\partial h U_x^2}{\partial x} + \frac{\partial h U_x U_y}{\partial y} = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial x} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} - \frac{g}{p} \frac{h^2}{2} \frac{\partial p}{\partial x} + 2\Omega \sin \lambda U_y + \frac{\partial h \tau_{xx}^e}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{xy}^e}{\partial y} + M_x \quad [2]$$

$$\frac{\partial h U_y}{\partial t} + \frac{\partial h U_x U_y}{\partial x} + \frac{\partial h U_y^2}{\partial y} = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial y} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} - \frac{g}{p} \frac{h^2}{2} \frac{\partial p}{\partial y} - 2\Omega \sin \lambda U_x + \frac{\partial h \tau_{xy}^e}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{yy}^e}{\partial y} + M_y$$

en donde h es el calado, U_x , U_y son las velocidades horizontales promediadas en profundidad, g es la aceleración de la gravedad, Z_s es la elevación de la lámina libre, τ_s es la fricción en la superficie libre debida al rozamiento producido por el viento, τ_b es la fricción debido al rozamiento del fondo, ρ es la densidad del agua, Ω es la velocidad angular de rotación de la tierra, λ es la latitud del punto considerado, τ_{xx}^e , τ_{xy}^e , τ_{yy}^e son las tensiones tangenciales efectivas horizontales, y M_s , M_x , M_y son respectivamente los términos fuente/sumidero de masa y de momento, mediante los cuales se realiza la modelización de precipitación, infiltración y sumideros.

Se incluyen los siguientes términos fuente en las ecuaciones hidrodinámicas:

- Presión hidrostática
- Pendiente del fondo
- Tensiones tangenciales viscosas y turbulentas
- Rozamiento del fondo
- Rozamiento superficial por viento
- Precipitación
- Infiltración

Se modelan asimismo los frentes seco-mojado, tanto estacionarios como no estacionarios, que puedan aparecer en el dominio. Dichos frentes son fundamentales en la modelización de zonas inundables en ríos, así como en estuarios.

El módulo de turbulencia permite incluir las tensiones turbulentas en el cálculo hidrodinámico, pudiéndose utilizar para ello diferentes modelos de turbulencia para aguas someras con diferente grado de complejidad. En la versión actual se incluyen un modelo parabólico, un modelo de longitud de mezcla y un modelo k-ε.

El módulo de transporte de sedimentos resuelve las ecuaciones de transporte de fondo y transporte turbulento en suspensión, calculando a partir del balance de masa de sedimento la evolución de la cota de fondo. La variación de la cota del fondo se calcula mediante la ecuación de conservación del sedimento de Exner:

$$(1 - p) \frac{\partial Z_b}{\partial t} + \frac{\partial q_{sb,x}}{\partial x} + \frac{\partial q_{sb,y}}{\partial y} = D - E \quad [3]$$

en donde p es la porosidad de los sedimentos que forman el lecho, Z_b es la cota del fondo, $q_{sb,x}$ y $q_{sb,y}$ son las dos componentes del caudal sólido de fondo. La diferencia D-E representa un balance entre carga de fondo y carga en suspensión. El término de acoplamiento entre transporte de fondo y transporte en suspensión que modela la resuspensión/deposición de sedimento se evalúa a partir de la expresión propuesta por Van Rijn (1987).

El caudal sólido de fondo se calcula a partir de formulaciones empíricas. En la versión actual del modelo se implementan dos formulaciones ampliamente conocidas y utilizadas:

Meyer-Peter & Müller con la corrección de Wong y Parker (2006)

$$q_{sb}^* = 3.97(\tau_{bs}^* - \tau_c^*)^{3/2} \quad [4]$$

En caso de fondo plano se considera $\tau_c^* = 0.0495$. En caso contrario, es necesario realizar una corrección por pendiente de fondo. Esta última formulación corregida es la incluida en IBER.

Van Rijn (1984)

$$\begin{aligned} T < 0.3 &\rightarrow q_{sb}^* = 0.053 \frac{T^{2.1}}{D_*^{0.3}} \\ T > 0.3 &\rightarrow q_{sb}^* = 0.100 \frac{T^{1.5}}{D_*^{0.3}} \end{aligned} \quad [5]$$

siendo T un parámetro adimensional que mide el exceso de fricción de fondo por encima del valor crítico que define el umbral del movimiento:

$$T = \frac{\tau_{bs}^* - \tau_c^*}{\tau_c^*} \quad [6]$$

El diámetro adimensional se define como:

$$D_* = D_s \left(\frac{gR}{v^2} \right)^{1/3} \text{ con } R = \frac{y_s - y}{y} \quad [7]$$

No se entra en detalles sobre otras capacidades del modelo puesto que no fueron empleadas en este trabajo, pero puede encontrarse más información en la página web del proyecto (IBER 2010).

Modelo del Meandro de Quinzanas

Dado que las simulaciones se realizan con IBER, el modelo específico para el Meandro de Quinzanas se desarrolló siguiendo los requerimientos de esta aplicación.

Se ha creado un modelo digital del terreno del tramo de estudio a partir de la cartografía digital disponible, una topografía 1:1000 del proyecto LINDE junto con una colección de 110 perfiles transversales, esto incluyó la depuración de la información con el objetivo que fuera una buena base de partida para la simulación numérica bidimensional. Utilizando el software comercial ArcGIS y a partir de la capa de curvas de nivel, la capa de batimetría y un polígono que define el contorno de la zona de estudio, se creó una TIN. Por último se convirtió la TIN al formato Raster empleando celdas de 5 m. La elección del tamaño de celda surge de un compromiso entre la representatividad de la aproximación obtenida y las dimensiones del archivo final.

En la Figura 3 pueden verse una imagen de las capas de curvas y puntos iniciales así como una imagen de la TIN creada a partir de estas.



Figura 3.- Detalle en la zona del Meandro de las capas de origen y TIN interpolada.

El archivo raster antes mencionado se importó en el entorno IBER obteniendo una superficie representativa de la zona de estudio. Esta superficie se discretizó con una malla irregular de 23360 triángulos. La malla se construyó con las herramientas estándar de mallado de la interface (GiD, CIMNE 2009), y en concreto limitando el máximo error cordal entre la malla y la geometría original. La Figura 4 muestra una imagen de la malla empleada en el cálculo.

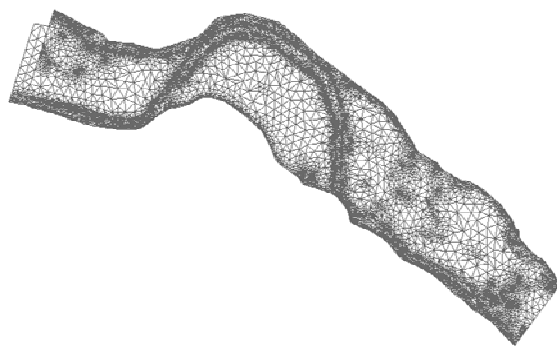


Figura 4.- Malla de elementos triangulares obtenida aplicando la limitación por error cordal.

Se ha modelado y simulado el tramo de estudio para los caudales máximos de 500, 100, 5 y 2 años de período de retorno.

Tabla 1.- Caudales correspondientes a los diferentes períodos de retorno estudiados.

Periodo de retorno	Caudal máximo
2 años	86.81 m ³ /s
5 años	243.13 m ³ /s
100 años	1966.59 m ³ /s
500 años	3199.30 m ³ /s

En primera instancia se realizaron los estudios empleando únicamente el modelo hidrodinámico y en una segunda etapa se incorporó la consideración de zonas de lecho móvil para lo cual se activó también el módulo de transporte de fondo.

Además de la geometría original, que considera el estado actual de la zona, se han estudiado otros escenarios con distintas geometrías para conseguir el mejor funcionamiento hidráulico y morfológico del tramo según las propuestas del documento de participación pública (CHC 2009).

DESCRIPCIÓN DEL MODELO FÍSICO REDUCIDO

El modelo físico reducido está construido en las instalaciones del CEH. Se trata de un modelo a escala 1:85, que representa los 4 km de la zona de estudio.

El modelo incluye zonas de lecho fijo y zonas de lecho móvil para poder reproducir con mayor precisión el comportamiento del río. Desde el punto de vista de la metodología de medición en el modelo hay instalados 48 limnímetros electrónicos.

La Figura 5 se muestra un detalle del modelo físico reducido en el que se observa el inicio del meandro y los límites entre la llanura de inundación, con lecho fijo, y el cauce, con lecho móvil; así mismo son visibles los soportes sobre los que están dispuestos los limnímetros.



Figura 5.- Modelo físico reducido durante uno de los ensayos.

RESULTADOS

Las condiciones de contorno y parámetros generales empleados en el modelo del Meandro de Quinzanas pueden resumirse en: Entrada Caudal constante (Tabla 1), Salida tipo Vertedero, Condición inicial seco, Rugosidad de Manning según uso del suelo (Figura 6). La consideración del transporte de fondo se realizó utilizando la ecuación de Meyer-Peter & Müller [Eq. 4] representado el sedimento mediante el D_{50} .

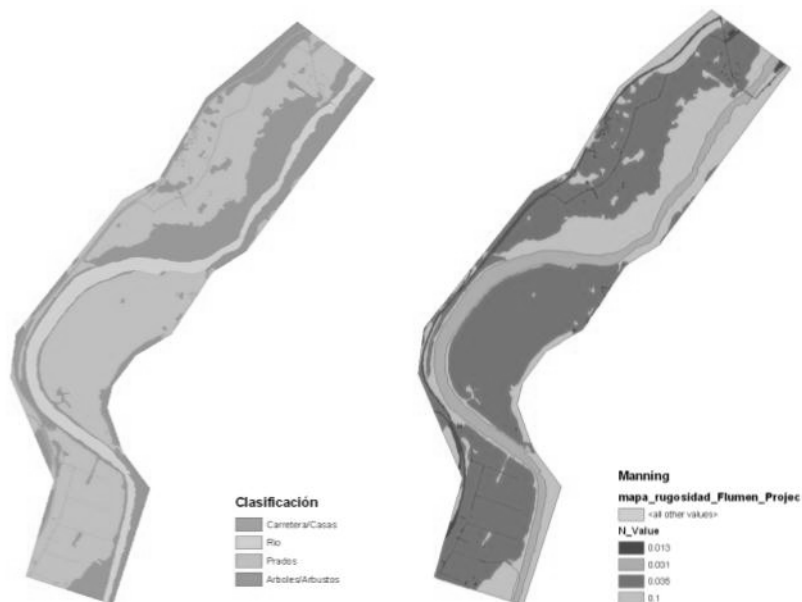


Figura 6.- Clasificación de Usos del Suelo y distribución del coeficiente de rugosidad de Manning.

Colaboración en la puesta en marcha del modelo físico

Como ya se ha mencionado, una de las primeras tareas que se llevaron a cabo mediante simulación

numérica fue el estudio de la posición y tipología de la condición de contorno de salida. En este caso se analizó, primero, si los calados en la zona que se proponía como salida estaba o no influida por la condición de contorno. Para ello se realizó un estudio de sensibilidad de los calados a la condición de contorno de salida, que en la práctica significó que para cada uno de los caudales se realizaron siete simulaciones variando la condición de contorno de salida. Este análisis permitió determinar que en la zona que se había definido como final del modelo físico ya no había influencia de la condición aplicada y por lo tanto se pudo proponer, para cada caudal, una condición de contorno en forma de calado. En la Figura 7 se pueden ver, a modo de ejemplo, los resultados del análisis de sensibilidad para el caudal de T 100 años y en la Figura 8 la comparación de calados en función del coeficiente de desagüe a partir del cual pudo inferirse el calado recomendado.

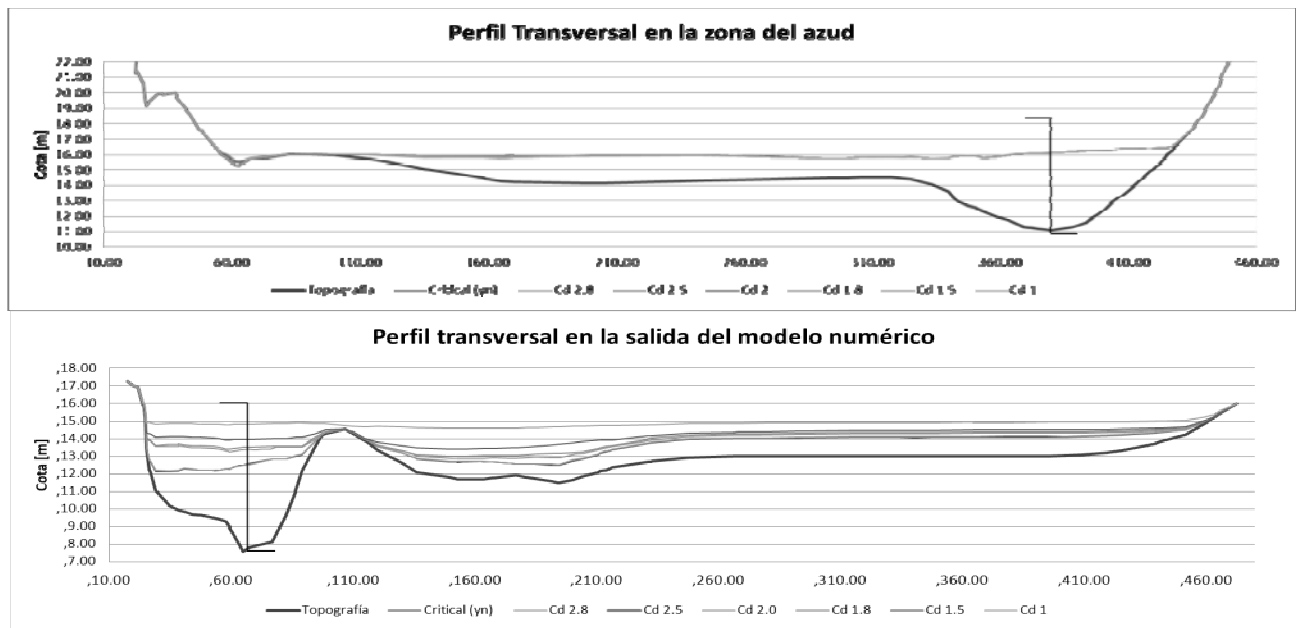


Figura 7.- Perfiles transversales en la zona de salida del modelo físico (arriba) y en la zona de salida del modelo numérico (abajo). Caudal período de retorno de 100 años. Superposición de las láminas de agua correspondientes a las diferentes condiciones de contorno.

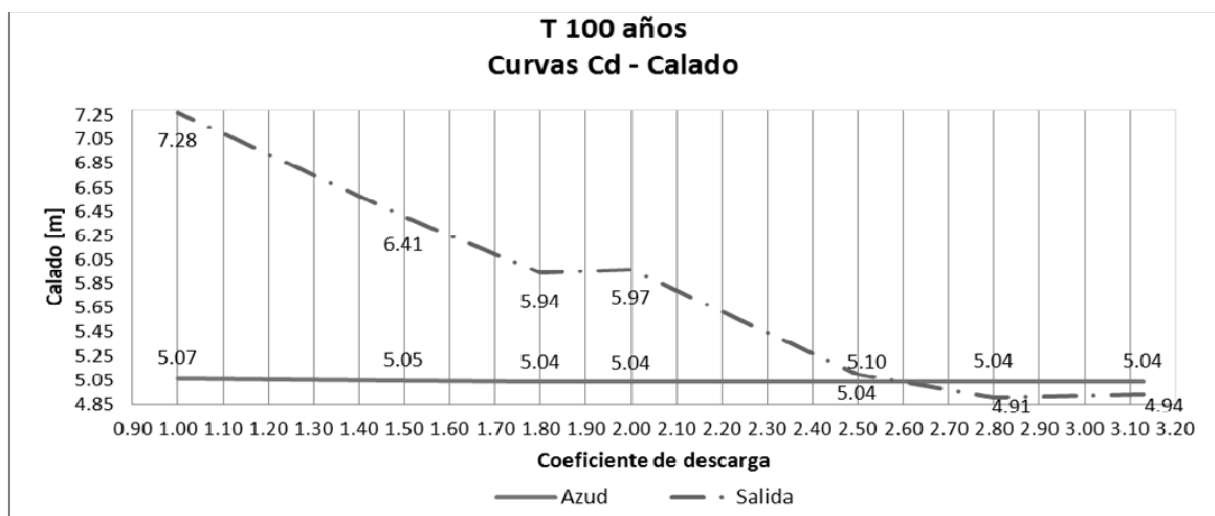


Figura 8.- Gráfica Coeficiente de descarga vs. Calado para el caudal período de retorno 100 años ($Q=1966.59 \text{ m}^3/\text{s}$), en las salidas del modelo físico (Azud) y en la salida del modelo numérico (Confluencia).

Con la información de los calados recomendados y con la experiencia de sus expertos el Laboratorio de Hidráulica definió las dimensiones finales del modelo físico y los instrumentos mediante los cuales representarían las condiciones de contorno. Con esta información se realizaron nuevas simulaciones que representaban todas estas características para garantizar que la zona de lecho móvil quedaba fuera de longitud que se ve, lógicamente, afectada por los efectos de la imposición de una condición de contorno. La Figura 9 muestra, a modo de ejemplo, una de las gráficas que se emplearon para esta determinación. Cabe además remarcar que como era de esperar la longitud influida varia con el caudal estudiado pero en ninguno de los casos alcanza el límite entre lecho fijo y lecho móvil.

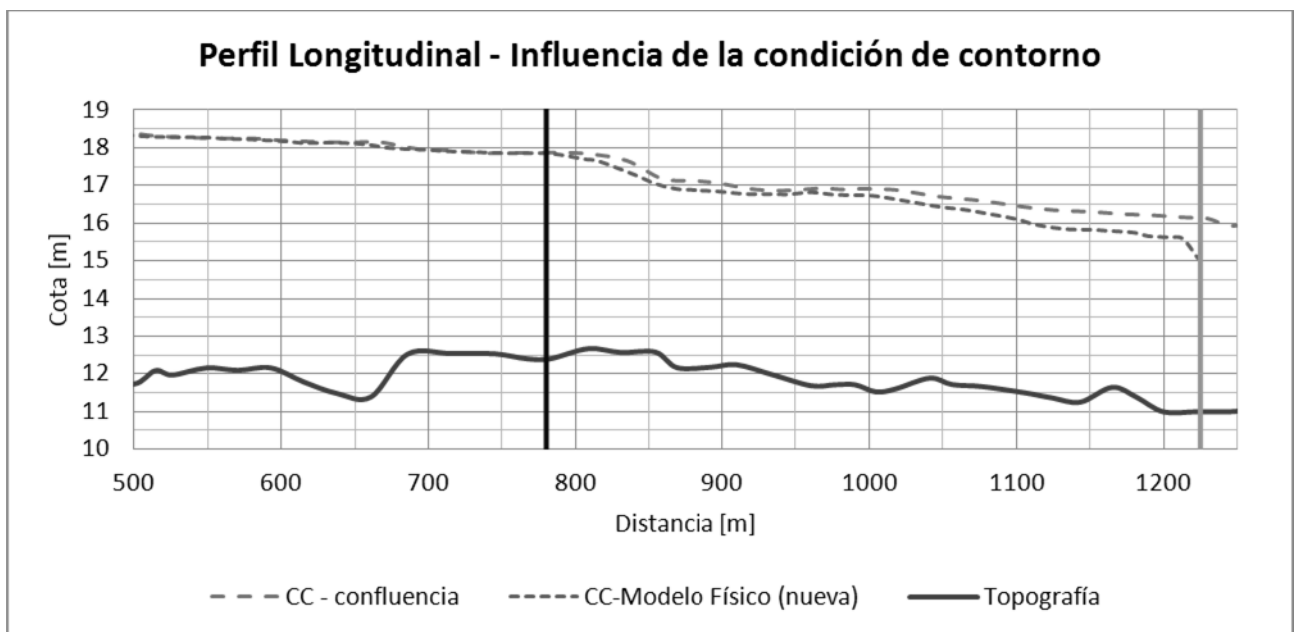


Figura 9.- Perfil longitudinal para el caudal período de retorno 100 años ($Q= 1966.59 \text{ m}^3/\text{s}$). Comparación de la lámina de agua aplicando la condición de contorno en la salida del modelo físico y en la salida del modelo numérico (Confluencia).

Comparación de los resultados entre ensayos y simulaciones

En este apartado se presentan algunos de los resultados que se obtuvieron en los ensayos de laboratorio realizados hasta el momento y se los compara con las simulaciones disponibles. Específicamente se muestran los resultados correspondientes al caudal de periodo de retorno 100 años ($Q= 1966.59 \text{ m}^3/\text{s}$).

La posición de los limnómetros, representada en el modelo físico se muestra en la Figura 8 y como se ve existe un número importante de los mismos que se sitúan en la zona del cauce.

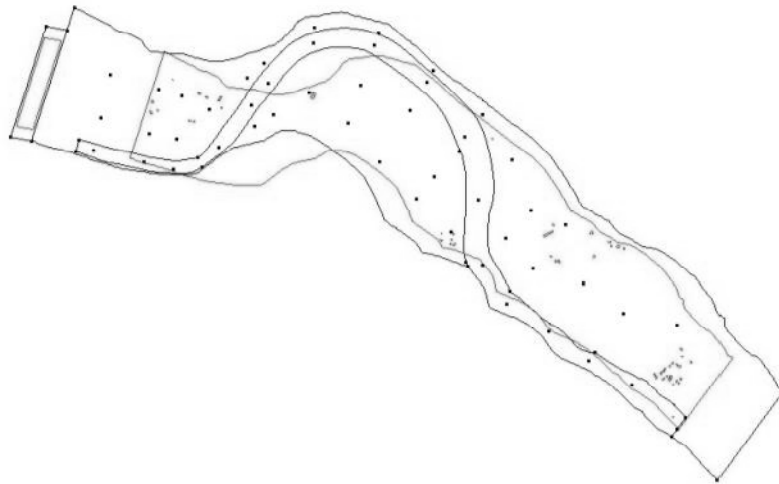


Figura 8.- Localización de limnómetros en el modelo físico.

Entre las tareas de preparación y ajuste del modelo físico, se llevó a cabo en el Laboratorio de Hidráulica del CEDEX una serie de ensayos enfocados a la verificación del ajuste de la fórmula de transporte de sólidos de Meyer-Peter & Müller a las condiciones del modelo. El resultado de estos ensayos se presenta en la Figura 9. Como se observa la formulación de M-P & M subestima los caudales sólidos que garantizarían el equilibrio con los sólidos que se emplean en los ensayos. Es por este motivo que la aportación de sólidos durante los ensayos se calculó empleando la expresión de ajuste a los datos de ensayo y no mediante M-P & M.

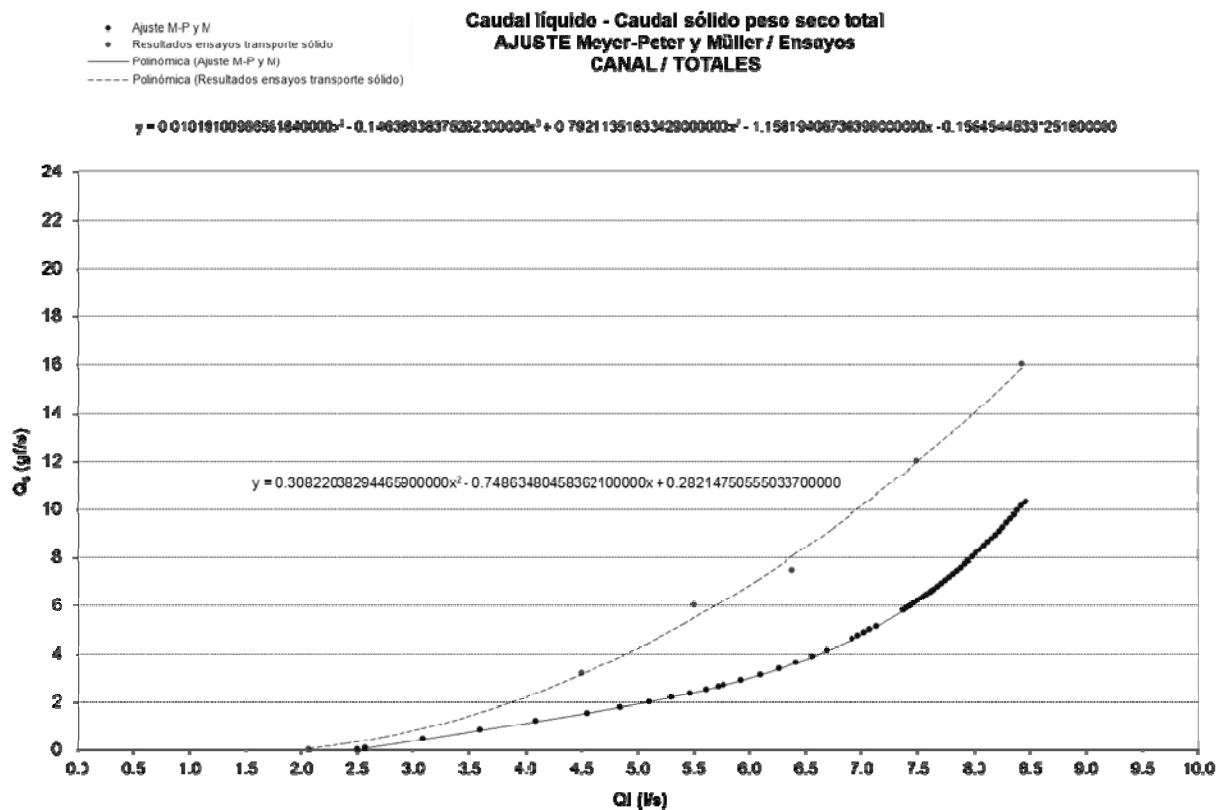


Figura 9.- Resultado de los ensayos de ajuste del arrastre de sólidos.

En la Figura 10 se presenta una comparación de la cota de la lámina de agua en los limnímetros del cauce. La gráfica compara los valores medidos en tres ensayos de laboratorio y los calculados en una simulación numérica de condiciones similares. La primera observación es que a primera vista no se observa un ajuste cuantitativo satisfactorio, sin embargo se conoce y se está trabajando en la corrección de los motivos esta aparente incongruencia.

El primer motivo identificado es el ya mencionado no ajuste de M-P & M, para corregir esta situación se está implementando en el modelo numérico la relación de transporte de caudal sólido que se ha determinado como válida en los ensayos.

El segundo motivo que se ha detectado son diferencias puntuales entre las cotas de la geometría del modelo físico y las del modelo numérico. Estas diferencias son claramente atribuibles a las diferentes metodologías empleadas para la creación de los modelos, pero, dado que es el modelo físico la referencia y el numérico el que está en validación se corrigió el modelo digital del terreno en estas zonas y actualmente se están repitiendo las simulaciones.

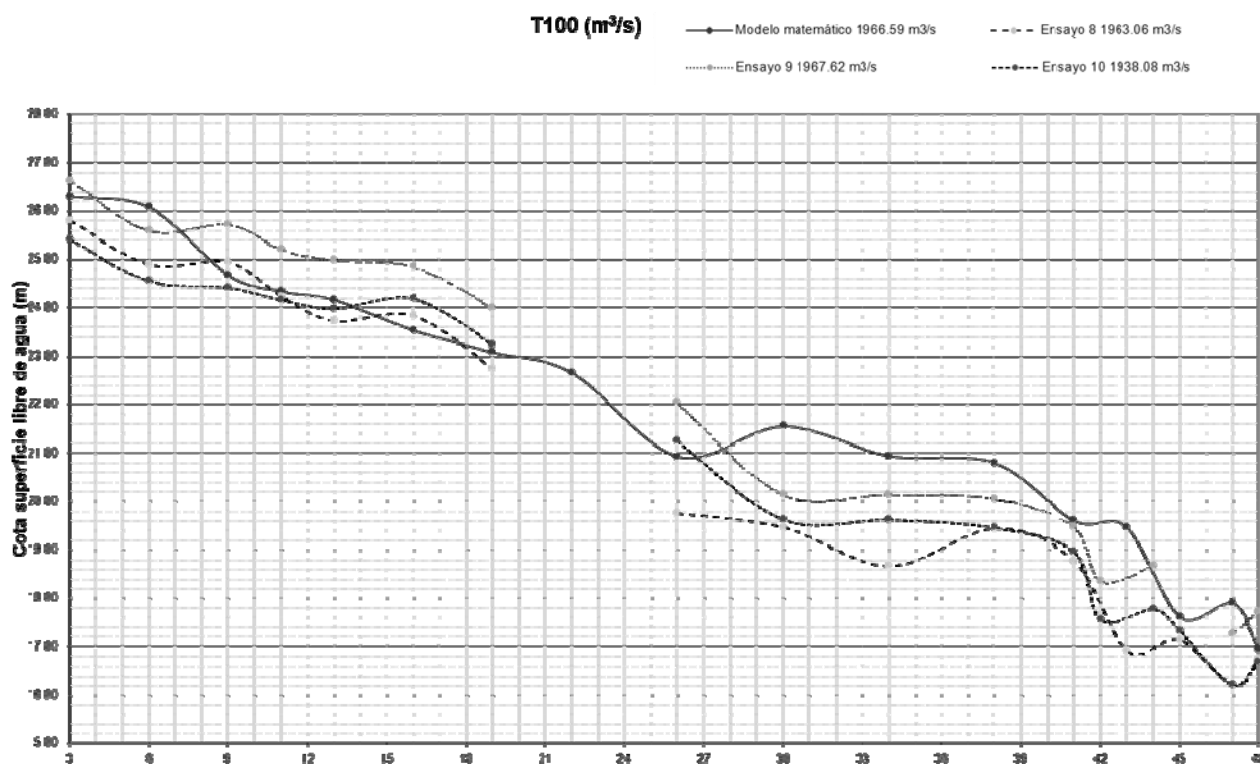


Figura 9.- Comparación de la cota de la lámina de agua en los limnómetros situados en el cauce, para el caudal de T 100 años.

Estudio numérico de las actuaciones propuestas

El documento de la Confederación Hidrográfica de Cantábrico propone diversas actuaciones a lo largo de todo el curso del bajo Narcea. De las actuaciones propuestas se simularon algunas de las que afectan a nuestra zona de estudio. En este caso, y para dar mayor validez a las pruebas, se emplearon en lugar de los caudales máximos los hidrogramas correspondientes a los diferentes períodos de retorno.

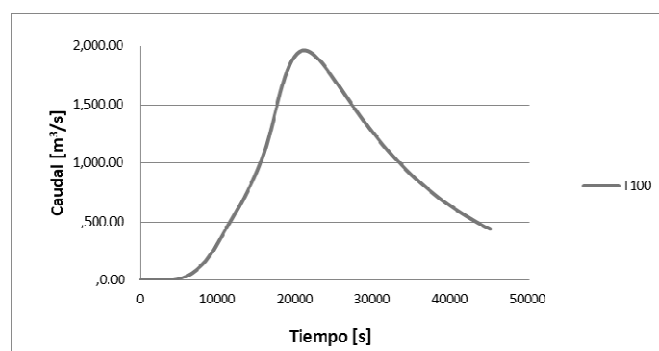


Figura 11.- Hidrograma de período de retorno 100 años.

La primera de las variaciones de geometría que se estudió corresponde a la retirada parcial del dique de protección construido en la margen izquierda. La segunda, para la cual se presentan algunos resultados representativos, consiste en la modificación del talud de la margen derecha del meandro, cambiando la geometría original para que la pendiente del mismo resulte más suave. Así mismo, se aplicó en esta zona un coeficiente de Manning representativo de bosques, tal y como se propone en las actuaciones del documento de participación pública. La representación de esta actuación se presenta en la Figura 12 tal y como se presenta en el documento antes mencionado.

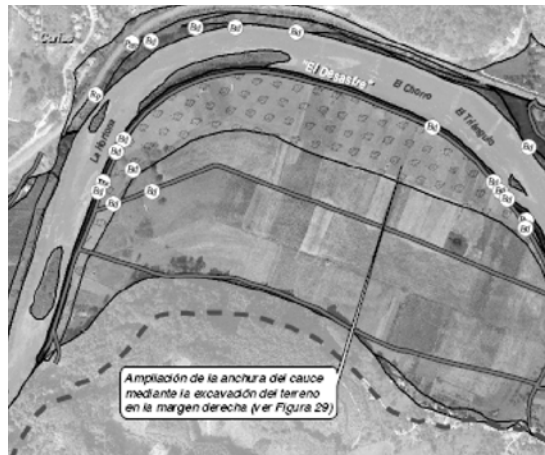


Figura 12.- Modificación del cauce de río en la zona central del meandro.

En la Figura 13 se muestran los cambios realizados en la geometría del modelo y en la Figura 14 cuál es la distribución de usos del suelo.

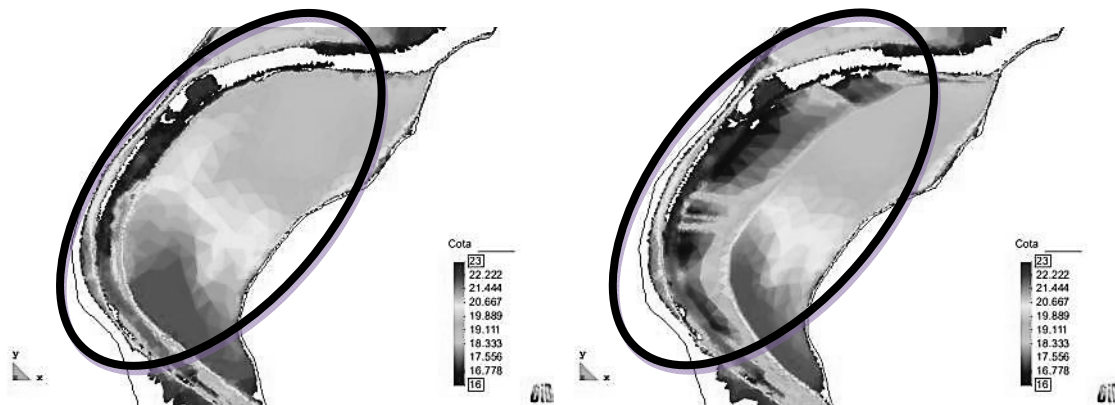


Figura 13.- Modificación de la geometría para representar el cambio en el talud interior del meandro.

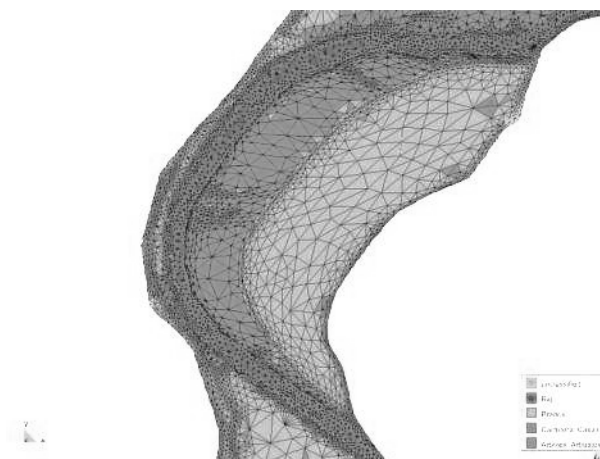


Figura 14.- Modificación de la distribución de usos del suelo en el meandro.

Las figuras siguientes muestran cómo varían las distribuciones de calados y de velocidades como resultado de la actuación aplicada. La Figura 15 y la Figura 16 corresponden a las simulaciones con caudal $1966.59 \text{ m}^3/\text{s}$.

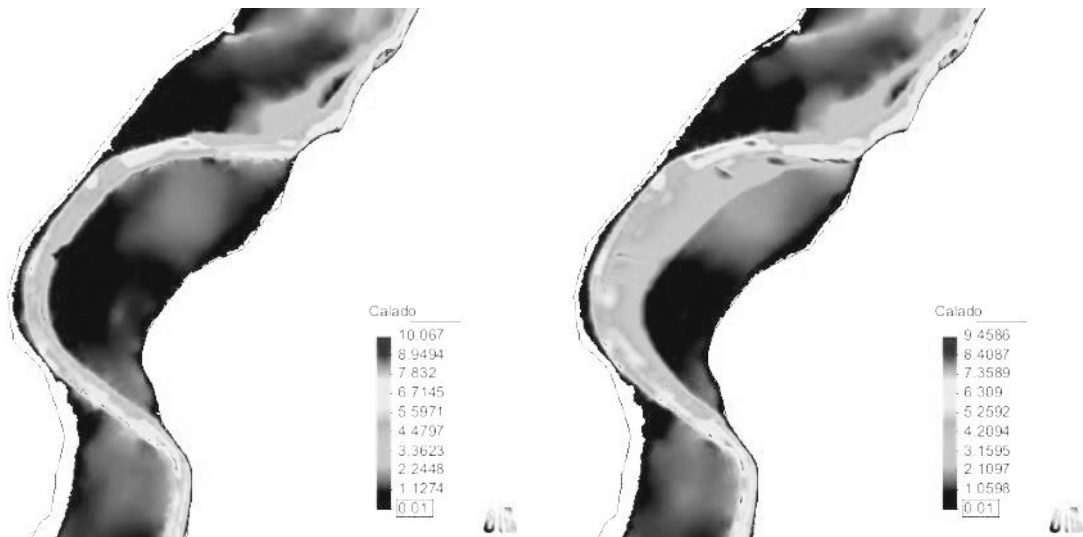


Figura 15.- Comparación de los calados antes y después de la modificación del talud (T100 años).

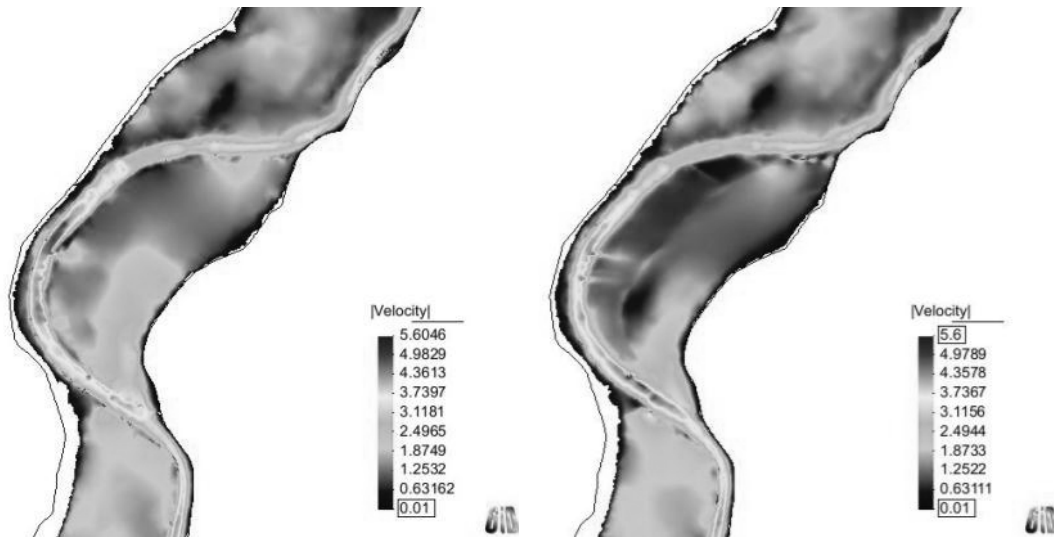


Figura 16.- Comparación de las velocidades antes y después de la modificación del talud (T100 años).

CONCLUSIONES

Se ha modelado satisfactoriamente el tramo del río Narcea coincidente con el meandro de Quinzanas, representando su complejidad geométrica y usos del suelo. Ha sido también posible estudiar la hidrodinámica del tramo para un rango de caudales amplio que abarca desde las crecidas muy frecuentes hasta las excepcionales.

El uso del modelo numérico como herramienta de soporte para la puesta del modelo físico ha resultado una estrategia muy conveniente, permitiendo realizar pruebas y tanteos previos para aumentar la certeza al momento de la construcción.

La información obtenida de los ensayos de laboratorio realizados en el modelo físico ha sido empleada en los estudios de calibración del modelo numérico del meandro de Quinzanas permitiendo la evolución y validación de dicho modelo.

REFERENCIAS

- Bladé, E., Gómez-Valentín, M.** (2006). *Modelación del flujo en lámina libre sobre cauces naturales. Análisis integrado en una y dos dimensiones*. Monograph CIMNE N°97.
- Cea, L.** (2005). *An unstructured finite volume model for unsteady turbulent shallow water flow with wet-dry fronts: Numerical solver and experimental validation*. Tesis Doctoral, Universidad de Coruña.
- CIMNE** (2009). *GiD. The personal pre and post-processor*. www.gidhome.com
- Confederación Hidrográfica del Cantábrico**. "Documento abierto para el proceso de participación pública – 12 de noviembre 2009". www.chcantabrico.es/participacion/PHC/index.php
- Flumen** (2009) "Estudio mediante un modelo matemático del meandro de Quinzanas en el río Narcea (Asturias)". *Convenio de colaboración entre el Centro de Estudios de Experimentación de obras Públicas i la Universitat Politècnica de Catalunya. Informe Final*.
- IBER** (2010) www.iberaula.es
- Van Rijn, L. C.** (1987). Mathematical modelling of morphological processes in the case of suspended sediment transport. *Delft Hydraulics Communication No. 382*. Delft Hydraulics Laboratory, Delft The Netherlands.
- Van Rijn, L. C.**(1984). Sediment transport, part I: Bed load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol 110 (10)
- Wong, M., Parker, G.** (2006). "Reanalysis and Correction of Bed-Load Relation of Meyer-Peter and Müller Using Their Own Database." *Journal of Hydraulic Engineering* 132(11): 1159-1168.